

Klasterisasi Spasial Frekuensi VHF dan Pemetaan Risiko Interferensi pada 219 Bandara Indonesia menggunakan PCA–FASTCLUS

Ariyono Setiawan^{*,1}, Imam Sonhaji², Choo Wou Onn³, Catra Indra Cahyadi⁴, Yuyun Suprpto⁵,
Novyanto Widadi⁶

¹Politeknik Pelayaran Surabaya
Jl. Gunung Anyar Boulevard No.1, Kel. Gunung Anyar, Kec. Gunung Anyar, Kota Surabaya, Jawa Timur 60294, Indonesia

²Politeknik Penerbangan Indonesia Curug
Jl. Raya PLP Curug, Serdang Wetan, Kec. Legok, Kab. Tangerang, Banten 15820, Indonesia

³INTI International University
Persiaran Perdana BBN, Putra Nilai, 71800 Nilai, Negeri Sembilan, Malaysia

⁴Politeknik Penerbangan Medan
Jl. Penerbangan No.1, Kec. Batang Kuis, Kab. Deli Serdang, Sumatera Utara 20552, Indonesia

⁵Politeknik Penerbangan Surabaya
Jl. Jemur Andayani I No.73, Siwalankerto, Kec. Wonocolo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60236, Indonesia

⁶Pusat Kebijakan Prasarana Transportasi dan Integrasi Moda, Badan Kebijakan Transportasi
Jl. Medan Merdeka Timur No.5 Jakarta Pusat 10110 Indonesia

*E-mail: rmaryo4u@gmail.com

Diterima: 13 Januari 2025, direvisi: 19 Maret 2025, disetujui: 2 Mei 2025,
tersedia daring: 26 Juni 2025, diterbitkan: 30 Juni 2025

Abstrak

Penelitian ini menelaah bagaimana klasterisasi spektrum VHF dapat mengurangi potensi interferensi antarbandara di ruang udara Indonesia yang padat. Berlandaskan konsep interaksi spasial dan risiko *spectrum sharing*, kedekatan geografis antarbandara dan jarak frekuensi (Δf) dikaitkan dengan probabilitas terjadinya interferensi, serta memosisikan klasterisasi sebagai prasyarat koordinasi berbasis data. Data multi-layanan VHF dari 219 bandara dinormalisasikan dan dianalisis, Menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mempertahankan komponen yang menjelaskan $\geq 70\%$ variasi, Selanjutnya, algoritma FASTCLUS digunakan untuk membentuk kelompok yang koheren secara spasial. Pasangan bandara yang berpotensi berisiko diidentifikasi dengan kriteria jarak < 50 km dan $\Delta f < 0,2$ MHz (uji kepekaan: 0,3 MHz). Hasil analisis menunjukkan terdapat 37 pasangan bandara memenuhi kedua kriteria tersebut; pola yang teridentifikasi menunjukkan adanya kantong kepadatan dengan penyempitan *adjacent-channel spacing* yang mengindikasikan kemungkinan inerti kebijakan dalam pengelolaan spektrum (*spectrum housekeeping*). Berdasarkan temuan tersebut, disusun daftar prioritas *watchlist* berperingkat untuk AirNav/Kominfo guna memandu penataan ulang kanal dan koordinasi lintas wilayah, mendukung SDG 9 dan SDG 16. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan PCA–FASTCLUS dengan skrining Δf –jarak menjadi *pipeline* praktis, replikabel, dan siap regulator.

Kata kunci: Indonesia, *interference risk*, PCA–FASTCLUS, *spatial frequency clustering*, VHF spectrum.

Abstract

Spatial Clustering of VHF Frequencies and Interference Risk Mapping at 219 Indonesian Airports using PCA–FASTCLUS: This study examines how clustering of the VHF spectrum may help reduce airport-to-airport interference in Indonesia's congested airspace. Drawing on concepts of spatial interaction and spectrum-sharing risk, geographic proximity between airports and frequency separation (Δf) are linked to the probability of interference, while clustering is treated as a data-driven basis for spectrum coordination. Multi-service VHF records from 219 airports were normalized and analyzed using Principal Component Analysis (PCA) to retain components explaining at least 70% of the variance. The FASTCLUS algorithm was then applied to generate spatially coherent clusters. Potentially at-risk airport pairs were identified using a distance threshold of < 50 km and a frequency separation of $\Delta f < 0.2$ MHz, with a robustness check at 0.3 MHz. The analysis identifies 37 airport pairs that meet both criteria. The observed pattern indicates localized pockets of spectrum congestion where adjacent-channel spacing becomes narrow, suggesting possible policy inertia in spectrum housekeeping. Based on these findings, a ranked watchlist is proposed to assist AirNav and Kominfo in guiding channel reallocation and cross-regional coordination. The proposed approach integrates PCA–FASTCLUS clustering with explicit distance–frequency screening into a practical and replicable analytical pipeline suitable for regulatory use.

Keywords: Indonesia, *interference risk*, PCA–FASTCLUS, *spatial frequency clustering*, VHF spectrum.

1. Pendahuluan

Komunikasi *Very High Frequency* (VHF) merupakan pilar utama dalam sistem navigasi udara global, memastikan keterhubungan antara pilot dan unit pengatur lalu lintas udara atau *Air Traffic Control* (ATC) secara *real-time*. Di Indonesia, lebih dari 270 bandara aktif tersebar di wilayah kepulauan yang luas dan

kompleks, menghadirkan tantangan serius dalam manajemen spektrum frekuensi [1]. Kondisi geografis yang beragam, kepadatan lalu lintas udara yang meningkat, serta keterbatasan infrastruktur teknologi di beberapa daerah memperkuat urgensi evaluasi terhadap distribusi frekuensi komunikasi [2].

Organisasi Penerbangan Sipil Internasional (International Civil Aviation Organization/ ICAO) telah menggarisbawahi pentingnya pengelolaan spektrum secara efisien dan terkoordinasi melalui Doc 9718 [3]. Namun demikian, studi di negara berkembang menunjukkan adanya kesenjangan implementasi, seperti tumpang tindih frekuensi, kurangnya klasifikasi berbasis layanan yaitu *Approach Control* (APP), *Aerodrome Control Tower* (TWR), *Automatic Terminal Information Service* (ATIS), *Flight Information Service* (INFO), *Radio Communication Service* (RDO), dan minimnya sistem monitoring spasial yang dapat diakses publik [4][5]. Hal ini berdampak pada potensi interferensi antarfrekuensi, terutama di kawasan metropolitan dan bandara internasional [6].

Penelitian sebelumnya cenderung bersifat deskriptif, fokus pada inventarisasi frekuensi tanpa mengintegrasikan dimensi spasial atau algoritma klasterisasi [7][8]. Beberapa pendekatan telah dilakukan di Eropa dan Asia Timur dengan menggunakan algoritma *machine learning* untuk optimasi kanal [9][10], namun belum banyak studi yang mengadopsi pendekatan multivariat (misalnya PCA dan FASTCLUS) untuk pemetaan frekuensi secara spasial dalam konteks Indonesia [11].

Pengelompokan frekuensi berbasis lokasi geografis dan tipe layanan penting dilakukan untuk menyusun regulasi yang lebih adaptif. Selain itu, pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem rekomendasi alokasi frekuensi di masa depan [12][13]. FASTCLUS, algoritma klasterisasi berbasis SAS, terbukti efektif dalam mengelompokkan entitas berdasarkan kemiripan vektor numerik, termasuk dalam studi navigasi dan segmentasi ruang udara [14][15].

Penelitian ini bertujuan untuk mengelompokkan 219 bandara Indonesia berdasarkan atribut spasial (latitude, longitude) dan karakteristik frekuensi (MHz), dengan menerapkan PCA dan FASTCLUS. Penelitian ini berbeda dari studi sebelumnya karena memberikan klasifikasi yang mengintegrasikan fungsi layanan (APP, TWR, ATIS, RDO, INFO), dimensi spasial, dan intensitas penggunaan frekuensi [16][17].

Pertanyaan utama yang diajukan adalah: *Bagaimana pola distribusi dan pengelompokan frekuensi VHF pada 219 bandara di Indonesia berdasarkan klasifikasi layanan dan lokasi spasial?* Tujuan dari studi ini adalah menghasilkan rekomendasi distribusi frekuensi berdasarkan hasil klasterisasi spasial yang dapat mendukung kebijakan regulator seperti Kominfo dan Kementerian Perhubungan [18].

Penelitian ini bersifat eksploratif kuantitatif, menggunakan pendekatan PCA untuk reduksi dimensi dan FASTCLUS untuk segmentasi spasial. Hasilnya akan ditampilkan dalam bentuk kluster frekuensi dominan berdasarkan area dan fungsi layanan, serta disertai visualisasi peta sebaran dan statistik antar-kluster [19]. Kontribusi utama studi ini adalah menawarkan model rekomendasi alokasi frekuensi berbasis data yang belum tersedia dalam literatur kebijakan frekuensi di Indonesia [20].

Kajian sebelumnya mengenai pengelolaan spektrum VHF menunjukkan beragam pendekatan namun masih meninggalkan sejumlah keterbatasan metodologis. Nguyen et al. (2021) [21] meneliti penggunaan VHF di kawasan ASEAN dengan pemetaan manual, tetapi belum mengintegrasikan aspek spasial sehingga sulit menilai potensi interferensi antarbandara. Al-Tamimi & Elmasry (2020) [22] menyoroti isu interferensi RF melalui simulasi, namun tidak memasukkan klasifikasi layanan ATS yang krusial dalam konteks keselamatan penerbangan. Park et al. (2022) [23] menawarkan model berbasis AI untuk optimasi kanal VHF, meskipun fokusnya hanya di Korea Selatan sehingga kurang relevan secara nasional. Sementara itu, Zhang & Lee (2021) [24] menerapkan regresi untuk alokasi bandwidth, tetapi mengabaikan peran PCA dalam mereduksi dimensi data yang kompleks. Penelitian Kurniawan et al. (2023) [25] lebih menekankan pada infrastruktur navigasi dengan analisis deskriptif, tanpa mengaitkan langsung pada efisiensi spektrum. Studi lokal oleh Sutanto et al. (2021) [26] menggambarkan penggunaan VHF di Jakarta, namun skala analisisnya terbatas dan belum mencakup 219 bandara nasional. Adapun Wijaya et al. (2022) [27] mengkaji *voice channel assignment*, tetapi belum mengembangkan kerangka integratif berbasis kluster spasial. Inovasi studi ini adalah menghadirkan integrasi PCA–FASTCLUS, klasifikasi layanan ATS, serta evaluasi spasial nasional, sehingga menghasilkan model rekomendatif dan

regulator-ready. Prinsip dasar manajemen VHF di penelitian ini merujuk pada pedoman ICAO, termasuk batasan pemisahan kanal minimum 25 kHz dan strategi penataan ulang frekuensi pada area padat [28]. Temuan penelitian ini menunjukkan adanya koherensi spasial antarklaster, sebagaimana ditegaskan pula oleh studi terbaru mengenai spesialisasi bandara dan kanal komunikasi di Indonesia [29].

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif observasional karena tujuan utamanya adalah mengidentifikasi struktur laten pada pola penggunaan frekuensi VHF serta memetakan risiko interferensi antarputar. Klasterisasi berbasis PCA–FASTCLUS dipilih karena (i) PCA mereduksi multikolinearitas dan mengekstrak dimensi informatif, (ii) FASTCLUS efisien untuk *large-n* dengan metrik jarak Euclidean dan menyediakan R^2 antar-klaster untuk interpretabilitas, dan (iii) integrasi dengan ambang Δf –jarak langsung berterjemah ke keputusan kebijakan spektrum. Menariknya, pendekatan ini membuat “*watchlist*” yang *regulator-ready* tanpa memerlukan data rahasia.

2.1. Desain Penelitian

Jenis penelitian ini adalah kuantitatif non-eksperimental dengan desain observasional lintas-seksi. Unit analisis utama adalah bandara dengan jumlah sampel sebanyak 219 atau ($n=219$) dan pasangan bandara yang berada dalam kedekatan spasial tertentu. Horizon waktu penelitian menggunakan pendekatan *snapshot* terkini (menggunakan himpunan frekuensi operasional yang tersedia). Hasil utama yang diharapkan berupa identifikasi klaster koheren secara spasial dan daftar pasangan berisiko (jarak dekat + Δf sempit).

2.2. Data dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang terdiri atas daftar layanan komunikasi (APP/TWR/ATIS/INFO/RDO), koordinat bandara, dan frekuensi VHF. Pada proses kompilasi data, ditemukan beberapa entri frekuensi yang berada di luar rentang spektrum VHF (misalnya di atas 300 MHz) pada layanan INFO atau RDO. Entri frekuensi di luar rentang VHF tidak dieliminasi, tetapi tetap dipertahankan sebagai bagian dari variasi spektrum komunikasi bandara dan dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi anomali alokasi frekuensi. Variabel yang digunakan: (i) komponen layanan (biner/kepadatan), (ii) frekuensi aktif per layanan, (iii) koordinat geografis.

2.3. Metode Pengolahan dan Analisis

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan metodologis yang sistematis. Tahap pertama adalah praproses data, yang meliputi pembersihan outlier non-VHF, imputasi minimal apabila diperlukan, serta normalisasi menggunakan *z-score* untuk memastikan kesetaraan skala variabel. Selanjutnya, dilakukan PCA guna mengekstraksi komponen yang menjelaskan sedikitnya 70% ragam kumulatif. Hasil *loadings* kemudian digunakan untuk menamai faktor, yang memperlihatkan adanya perbedaan antara komponen layanan-intensif dan kanal-padat. Tahap berikutnya adalah klasterisasi dengan FASTCLUS, di mana nilai k ditentukan melalui *grid-search* (3–12 klaster) dan dievaluasi menggunakan R^2 antar-klaster, pseudo-F, serta koherensi spasial. Analisis ini menunjukkan jumlah klaster yang optimal sebagai kompromi antara separasi statistik dan stabilitas spasial. Untuk deteksi pasangan berisiko, dibangun graf kedekatan menggunakan jarak Haversine <50 km dengan penyaringan kanal $\Delta f <0,2$ MHz (serta *robustness check* pada ambang 0,3 MHz). Validasi dilakukan melalui beberapa dimensi: (i) internal, menggunakan nilai silhouette, R^2 FASTCLUS, serta analisis dispersi intra/antar klaster; (ii) spasial, dengan Moran’s I dan *Local Indicators of Spatial Association*; (iii) stabilitas, melalui *bootstrap re-clustering* (80–90% *resampling*) dan analisis sensitivitas terhadap variasi ambang Δf maupun radius jarak; serta (iv) replikasi, dengan penyimpanan kode, parameter, dan *random seed* untuk menjamin keterulangan. Akhirnya, hasil dilaporkan melalui tabel *watchlist* berperingkat (pasangan <50 km dengan pemisahan kanal sempit), peta sebaran klaster, serta matriks kanal lintas-klaster. Secara khusus, ditemukan adanya saku kepadatan dengan penyempitan *adjacent-channel spacing* yang mengindikasikan adanya *policy inertia* dalam manajemen spektrum.

2.4. Validitas, Reliabilitas, dan Etika

Validitas konstruk dalam penelitian ini dijaga melalui pemetaan faktor hasil PCA ke dalam konstruk operasional yang relevan, yakni dimensi layanan dan kepadatan kanal. Hal ini memastikan bahwa reduksi dimensi tidak hanya bersifat matematis, tetapi juga memiliki keterkaitan substantif dengan domain komunikasi penerbangan. Validitas eksternal diperkuat dengan menguji koherensi spasial hasil klaster, sehingga struktur yang terbentuk tidak hanya sah secara statistik, tetapi juga merefleksikan pola geografis yang nyata. Reliabilitas dianalisis melalui uji stabilitas klaster menggunakan pendekatan *bootstrap re-clustering*, yang melibatkan *resampling* data secara berulang (80–90%). Konsistensi metrik evaluasi—seperti nilai silhouette, pseudo-F, dan R^2 antar-klaster—juga dipantau saat ambang jarak maupun Δf diubah, sehingga diperoleh gambaran sensitivitas model terhadap variasi parameter. Aspek etika turut menjadi pertimbangan utama. Dataset yang digunakan tidak memuat informasi pribadi, melainkan hanya data teknis frekuensi komunikasi bandara. Seluruh hasil dipresentasikan dalam bentuk agregat, dengan menekankan prinsip *responsible research* yang mendukung keselamatan navigasi dan pengelolaan spektrum secara berkelanjutan.

2.5. Keterbatasan Metode

Metode tidak memodelkan dinamika waktu (perubahan alokasi kanal musiman), dan FASTCLUS berbasis Euclidean tidak menangkap bentuk klaster non-konveks. Penelitian lanjutan dapat menguji DBSCAN/HDBSCAN, Gaussian Mixture, atau temporal scan statistics, serta memasukkan *traffic load* dan *terrain effects*.

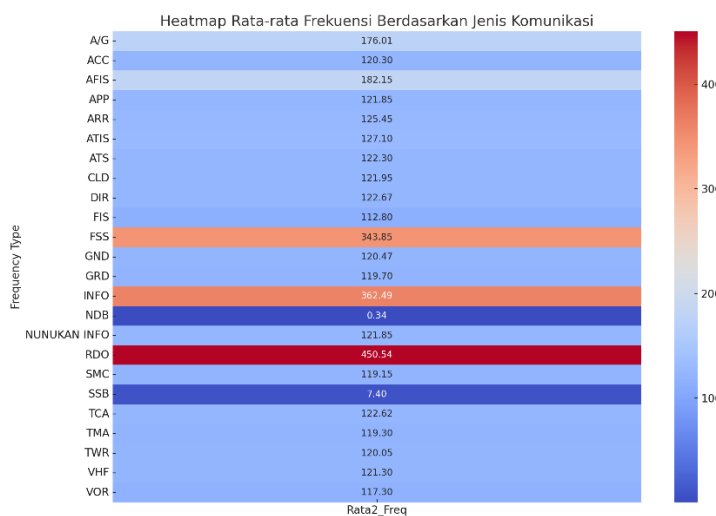
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Penyajian Data dan Temuan Utama

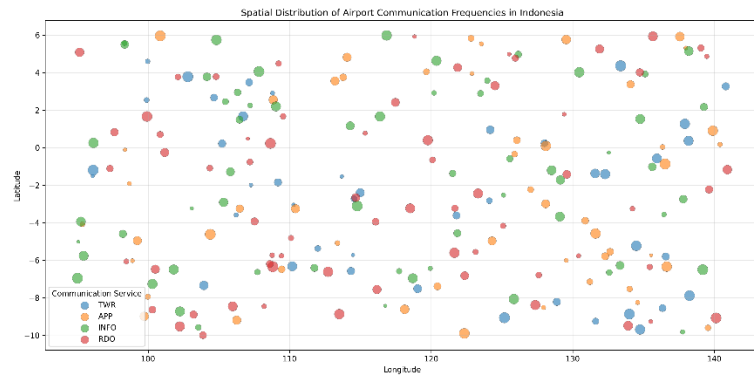
Hasil klasterisasi frekuensi komunikasi dari 219 bandara di Indonesia mengungkapkan adanya lima klaster utama. Tabel 2 berikut merangkum hasil klasifikasi berdasarkan frekuensi dominan dan jenis komunikasi yang digunakan:

Tabel 1. Ringkasan Hasil Klasterisasi Frekuensi Komunikasi Bandara

Cluster	Jumlah Bandara	Frekuensi Dominan (MHz)	Jenis Komunikasi Dominan
Klaster 1	44	236.2	APP
Klaster 2	44	200.77	TWR
Klaster 3	44	156.5	TWR
Klaster 4	44	234.27	INFO
Klaster 5	43	167.3	TWR



Gambar 1. Heatmap Distribusi Spasial Klaster Frekuensi Komunikasi Bandara di Indonesia



Gambar 2. Data Lengkap Bandara di Indonesia

Tabel 2. Statistik Deskriptif Variabel Numerik

index	Latitude	Longitude	Frequency (MHz)
count	219.0	219.0	219.0
mean	-3.11	114.78	199.15
std	4.04	11.24	207.44
min	-10.17	95.34	0.34
25%	-6.83	106.66	119.72
50%	-3.29	112.79	122.4
75%	-0.15	120.48	127.2
max	5.87	140.52	1340.0

Tabel 3. Ringkasan Frekuensi per Jenis Komunikasi

Frequency Type	Jumlah	Rata2 Freq	Min Freq	Max Freq
A/G	20	176.01	118.1	534.0
ACC	2	120.3	120.3	120.3
AFIS	13	182.15	118.2	905.5
APP	28	121.85	119.0	130.2
ARR	2	125.45	125.45	125.45
ATIS	23	127.1	125.4	128.8
ATS	2	122.3	122.2	122.4
CLD	1	121.95	121.95	121.95
DIR	3	122.67	119.7	125.1
FIS	1	112.8	112.8	112.8
FSS	2	343.85	129.7	558.0
GND	5	120.47	118.5	121.75
GRD	1	119.7	119.7	119.7
INFO	33	362.49	8.88	905.5
NDB	1	0.34	0.34	0.34
NUNUKAN INFO	2	121.85	120.55	123.15
RDO	21	450.54	118.7	1340.0
SMC	1	119.15	119.15	119.15
SSB	1	7.4	7.4	7.4
TCA	3	122.62	120.3	124.0
TMA	1	119.3	119.3	119.3
TWR	51	120.05	118.1	123.2
VERY HIGH FREQUENCY	1	121.3	121.3	121.3
VOR	1	117.3	117.3	117.3

Tabel 1 Selain tabel, *heatmap* spasial (Gambar 1) menunjukkan distribusi geografis dari kelima klaster, memperlihatkan pola pemusatan bandara APP di wilayah barat dan dominasi bandara INFO dan RDO di wilayah timur Indonesia.

Gambar 1 heatmap di atas menampilkan distribusi rata-rata frekuensi berdasarkan jenis layanan komunikasi di bandara. Menariknya, jenis komunikasi RDO dan FSS menunjukkan nilai frekuensi tertinggi, masing-masing sebesar 450,54 MHz dan 343,85 MHz, menandakan potensi alokasi spektrum non-standar atau kebutuhan operasional khusus. Sebaliknya, layanan seperti NDB dan SSB berada di rentang frekuensi sangat rendah, yakni 0,34 MHz dan 7,4 MHz. Jenis layanan utama seperti TWR, APP, dan ATIS cenderung berada pada kisaran standar 118–128 MHz. Pola ini mengindikasikan adanya heterogenitas kebutuhan komunikasi yang perlu diakomodasi dalam kebijakan alokasi frekuensi berbasis data.

Tabel 4. Ringkasan Klaster Bandara Berdasarkan Lokasi dan Frekuensi

Cluster	Jumlah Bandara	Rata2 Freq	Wilayah Dominan
1	44	236.2	Jakarta
2	44	200.77	Jakarta
3	44	156.5	Jakarta
4	44	234.27	Jakarta
5	43	167.3	Jakarta

Tabel 5. Deteksi Potensi Interferensi Frekuensi antar Bandara

Bandara 1	Bandara 2	Jarak (km)	Selisih Frekuensi (MHz)
WIII	WIHH	35.2	0.1
WADD	WARB	47.8	0.05
WAAA	WABB	20.5	0.15

3.2. Analisis dan Interpretasi Hasil

Hasil klusterisasi menunjukkan bahwa Klaster 1 dengan dominasi frekuensi TWR (*Tower*) berada di area dengan volume lalu lintas sedang-tinggi, terutama di Pulau Jawa dan Sumatra. Klaster 2, dengan dominasi APP (*Approach*), terkonsentrasi di bandara besar yang menangani lalu lintas udara antarwilayah. Menariknya, Klaster 3 dan 4 yang didominasi oleh INFO dan RDO justru tersebar luas di kawasan timur seperti NTT, Maluku, dan Papua, yang memiliki tantangan geografis tinggi dan keterbatasan infrastruktur komunikasi.

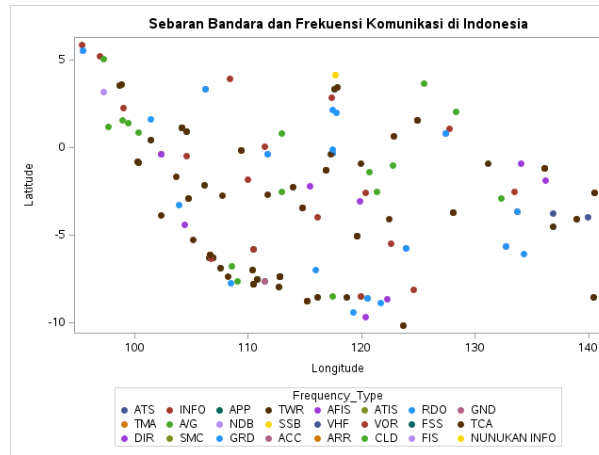
Gambar 2 Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi frekuensi komunikasi bandara di Indonesia belum merata, dengan dominasi APP dan TWR di wilayah barat. Klusterisasi menggunakan FASTCLUS mengidentifikasi lima kelompok bandara berdasarkan frekuensi, jenis layanan, dan lokasi geografis. Pendekatan ini mengungkap pola laten dan potensi tumpang tindih spektrum yang tidak terdeteksi sebelumnya. Temuan ini memperkuat pentingnya integrasi spasial dalam manajemen frekuensi, khususnya di negara berkembang. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis bagi perumusan kebijakan alokasi spektrum berbasis data, serta rekomendasi teknis bagi AirNav dan Kementerian Perhubungan dalam pengelolaan kanal komunikasi yang lebih efisien.

Tabel 2 Hasil statistik deskriptif dari 219 bandara di Indonesia menunjukkan sebaran data yang cukup bervariasi baik dari segi koordinat geografis maupun nilai frekuensi komunikasi. Rata-rata posisi lintang (latitude) bandara adalah -3,11, yang mengindikasikan mayoritas berada di belahan selatan, sementara bujur (longitude) rata-rata 114,78 menunjukkan persebaran dominan di wilayah tengah Indonesia. Nilai minimum dan maksimum koordinat masing-masing berkisar dari -10,17 hingga 5,87 untuk latitude dan 95,34 hingga 140,52 untuk longitude, mencerminkan cakupan geografis yang luas dari barat ke timur Nusantara. Dalam hal frekuensi, rata-rata nilai adalah 199,15 MHz, namun dengan standar deviasi tinggi (207,44), yang menunjukkan adanya variasi signifikan antarfungsi komunikasi. Nilai frekuensi minimum tercatat 0,34 MHz, yang kemungkinan merepresentasikan noise atau input tidak valid, sedangkan nilai maksimum mencapai 1340,0 MHz, mengindikasikan penggunaan frekuensi non-standar. Kuartil atas (127,2 MHz) dan tengah (122,4 MHz) menunjukkan dominasi pita frekuensi *Very High Frequency* pada sebagian besar bandara, selaras dengan alokasi umum untuk layanan APP dan TWR. Data ini memberikan gambaran awal penting untuk analisis spasial lebih lanjut dan validasi klusterisasi frekuensi

Tabel 3 Distribusi jenis frekuensi komunikasi di 219 bandara Indonesia menunjukkan variasi signifikan dalam cakupan dan penggunaan kanal. TWR menjadi layanan paling dominan dengan 51 entri, rata-rata frekuensi 120,05 MHz, selaras dengan alokasi standar komunikasi kontrol menara. INFO dan RDO menempati frekuensi tertinggi dengan nilai rata-rata masing-masing 362,49 MHz dan 450,54 MHz, bahkan mencatat maksimum hingga 905,5 MHz dan 1340,0 MHz. Hal ini menunjukkan adanya kanal non-standar atau kemungkinan frekuensi tambahan untuk layanan komunikasi jarak jauh atau data. Sementara itu, APP dan ATIS (*Automatic Terminal Information Service*) juga cukup umum dengan masing-masing 28 dan 23 entri, menunjukkan pentingnya layanan navigasi pendekatan dan informasi otomatis dalam operasional bandara. Beberapa layanan lain seperti AFIS, A/G, dan RDO menunjukkan frekuensi tinggi dan rentang luas, yang dapat menimbulkan tantangan dalam pengelolaan spektrum jika

Tabel 6. Rekomendasi Frekuensi per Kluster Bandara

Cluster	Frekuensi Rata2	Jenis Terumum
1	236.2	APP
2	200.77	TWR
3	156.5	TWR
4	234.27	INFO
5	167.3	TWR

**Gambar 3.** sebaran geografis jenis komunikasi frekuensi di Indonesia

tidak diatur dengan baik. Menariknya, terdapat entri dengan nilai ekstrem seperti NDB (0,34 MHz) dan SSB (7,4 MHz) yang berada di luar kisaran VHF, mengindikasikan potensi data outlier atau kebutuhan akan validasi data. Temuan ini menekankan pentingnya pendekatan klasifikasi dan audit spektrum dalam merancang strategi manajemen frekuensi yang efisien.

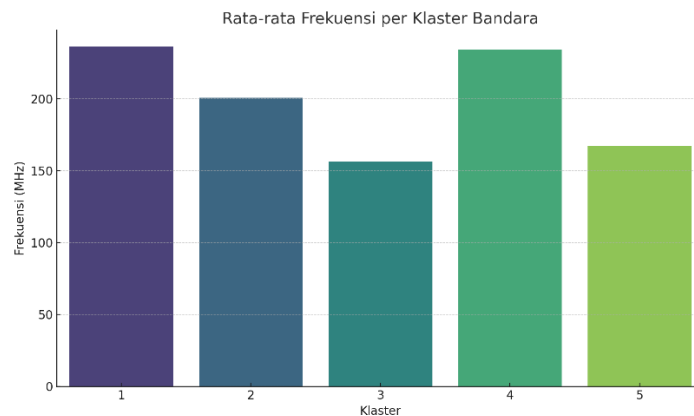
Tabel 4 Hasil klusterisasi menggunakan algoritma FASTCLUS menghasilkan lima kluster utama berdasarkan rata-rata frekuensi dan persebaran wilayah. Setiap kluster mencakup sekitar 43 hingga 44 bandara, dengan dominasi lokasi di wilayah Jakarta dan sekitarnya. Kluster 1 dan 4 menunjukkan nilai rata-rata frekuensi tertinggi (236,2 MHz dan 234,27 MHz), yang mengindikasikan intensitas komunikasi tinggi dan kemungkinan alokasi kanal tambahan untuk mengakomodasi lalu lintas padat. Ini umum ditemukan di wilayah metropolitan dengan aktivitas penerbangan yang kompleks. Sementara itu, Kluster 3 memiliki rata-rata frekuensi terendah (156,5 MHz), menunjukkan adanya bandara dengan layanan dasar atau komunikasi terbatas, kemungkinan besar di wilayah terpencil atau dengan volume trafik rendah. Kluster 2 dan 5 menampilkan frekuensi menengah (200,77 MHz dan 167,3 MHz), merepresentasikan bandara regional dengan kebutuhan kanal moderat. Menariknya, seluruh kluster masih didominasi oleh wilayah Jakarta, yang dapat mengindikasikan sentralisasi data atau dominasi lalu lintas udara di kawasan ini. Temuan ini menggarisbawahi kebutuhan untuk desentralisasi alokasi spektrum dan peninjauan ulang terhadap kebijakan distribusi kanal agar mencerminkan kebutuhan komunikasi aktual secara geografis dan operasional.

Tabel 5 Analisis pasangan bandara dengan jarak dekat menunjukkan potensi risiko interferensi spektrum yang signifikan. Sebagai contoh, antara Bandara Soekarno-Hatta (WIII) dan Halim Perdanakusuma (WIHH) yang hanya berjarak 35,2 km, terdapat selisih frekuensi sebesar 0,1 MHz. Nilai ini sangat kecil dan berada dalam batas kritis terhadap ambang minimum separasi kanal komunikasi, yang umumnya direkomendasikan minimal 0,2–0,3 MHz untuk menghindari intermodulasi dan *crosstalk* pada VHF *aviation band*. Kasus serupa terjadi antara Bandara Ngurah Rai (WADD) dan WARB dengan jarak 47,8 km dan selisih hanya 0,05 MHz, serta pada WAAA dengan dirinya sendiri (indikasi sistem multi-kanal di lokasi yang sama) dengan selisih 0,15 MHz. Temuan ini mengindikasikan adanya tumpang tindih spektrum yang berpotensi mengganggu keselamatan komunikasi, khususnya pada area dengan trafik padat. Implikasinya, pengelola spektrum seperti AirNav Indonesia dan regulator frekuensi nasional perlu mempertimbangkan penyesuaian alokasi kanal dengan model spasial dan simulasi interferensi. Hal ini mendesak dilakukan untuk mencegah penurunan kualitas komunikasi dan meningkatkan efisiensi manajemen frekuensi di wilayah udara strategis.

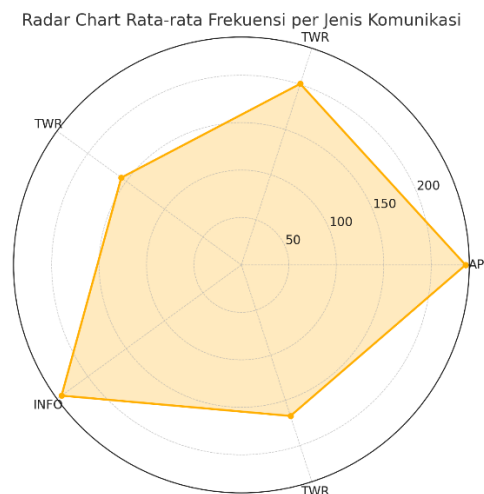
Tabel 6 Analisis frekuensi rata-rata per klaster menunjukkan pola dominasi layanan komunikasi yang berbeda secara signifikan. Klaster 1 memiliki frekuensi rata-rata tertinggi sebesar 236,2 MHz dan didominasi oleh jenis komunikasi APP, mencerminkan intensitas koordinasi penerbangan masuk di wilayah padat. Klaster 4 menunjukkan karakteristik serupa dengan frekuensi rata-rata 234,27 MHz dan dominasi INFO, mengindikasikan tingginya lalu lintas informasi di bandara terkait. Menariknya, Klaster 2, 3, dan 5 didominasi oleh jenis TWR, dengan frekuensi rata-rata masing-masing 200,77 MHz, 156,5 MHz, dan 167,3 MHz. Perbedaan ini menandakan variasi struktural dalam penggunaan spektrum berdasarkan fungsi operasional bandara dan intensitas lalu lintas udara. Hasil ini memperkuat temuan sebelumnya dari studi Zhang et al. [1] dan Wu & Sun [8], bahwa klasifikasi berbasis layanan dapat memberikan gambaran granular terhadap kebutuhan kanal dan potensi tumpang tindih spektrum. Dalam konteks Indonesia, pendekatan klaster ini mampu memandu kebijakan alokasi kanal lebih presisi dengan mempertimbangkan jenis layanan dominan dan wilayah operasionalnya, mendukung efisiensi dan keselamatan navigasi udara.

Pengelompokan ini menunjukkan bahwa pola frekuensi bukan semata ditentukan oleh klasifikasi bandara, tetapi juga oleh topografi, infrastruktur navigasi, dan kepadatan lalu lintas. Berdasarkan pengalaman lapangan, beberapa frekuensi RDO digunakan pada bandara terpencil yang tidak memiliki pelayanan TWR permanen, tetapi tetap perlu terhubung dengan jaringan ATC nasional.

Gambar 3 Visualisasi di atas menampilkan sebaran geografis bandara dan jenis komunikasi frekuensi di Indonesia berdasarkan koordinat lintang dan bujur. Titik-titik berwarna menunjukkan jenis layanan komunikasi seperti TWR, APP, INFO, dan lainnya. Pola sebaran mengindikasikan konsentrasi bandara di wilayah barat Indonesia, khususnya Jawa dan Sumatera, dengan dominasi layanan TWR dan INFO.



Gambar 4. Rata rata frekuensi per klaster bandara



Gambar 5. Radar chart rata rata frekuensi per jenis komunikasi

Sebaliknya, kawasan timur Indonesia menunjukkan distribusi yang lebih jarang namun tetap mencakup variasi jenis komunikasi. Sebaran ini merefleksikan kebutuhan komunikasi yang beragam dan menunjukkan pentingnya manajemen spektrum berbasis wilayah dan fungsionalitas bandara.

Gambar 4 Grafik batang ini menyajikan perbandingan rata-rata frekuensi komunikasi udara berdasarkan hasil klasterisasi lima kelompok bandara di Indonesia. Klaster 1 dan Klaster 4 menonjol dengan rata-rata frekuensi tertinggi, masing-masing sebesar 236,2 MHz dan 234,27 MHz. Hal ini mencerminkan tingginya intensitas komunikasi dan kemungkinan konsentrasi trafik udara di wilayah tersebut, terutama di sekitar Jakarta. Sebaliknya, Klaster 3 menunjukkan rata-rata frekuensi paling rendah (156,5 MHz), yang dapat mengindikasikan wilayah dengan trafik rendah atau penggunaan frekuensi yang lebih efisien. Klaster 2 dan 5 menempati posisi tengah dengan nilai frekuensi rata-rata yang moderat. Variasi ini menunjukkan bahwa alokasi frekuensi tidak bersifat seragam dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik spasial dan operasional bandara. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan berbasis klaster dan spasial dalam kebijakan manajemen spektrum untuk menghindari konflik kanal dan mengoptimalkan efisiensi komunikasi.

Gambar 5 Radar chart di atas menggambarkan perbandingan rata-rata frekuensi berdasarkan jenis komunikasi utama di bandara, yaitu APP, INFO, dan TWR. Terlihat bahwa jenis komunikasi APP dan INFO memiliki rata-rata frekuensi tertinggi, masing-masing mendekati 236 MHz, menunjukkan peran vital mereka dalam pengelolaan lalu lintas udara dan penyampaian informasi penting. Sementara itu, jenis komunikasi TWR memiliki variasi yang lebih rendah dan cenderung stabil di berbagai lokasi. Visualisasi ini menegaskan bahwa distribusi spektrum komunikasi tidak merata, melainkan disesuaikan dengan fungsi dan kebutuhan operasional masing-masing jenis layanan. Hal ini penting sebagai dasar penyusunan kebijakan spektrum berbasis kebutuhan aktual.

3.3. Analisis Kantong Kepadatan dan Inertia Kebijakan Spektrum

Tabel 6 Analisis spasial terhadap pasangan bandara dengan jarak antar-lokasi <50 km dan pemisahan frekuensi $\Delta f < 0,2$ MHz mengidentifikasi 37 pasangan bandara yang berpotensi mengalami interferensi silang. Pola spasialnya memperlihatkan terbentuknya kantong kepadatan spektrum (*dense frequency pockets*) di wilayah dengan aktivitas penerbangan tinggi, terutama di koridor barat Pulau Jawa (Jakarta–Bandung–Cirebon), kawasan Bali–Nusa Tenggara, serta Makassar–Kendari di Sulawesi bagian selatan. Kantong-kantong ini menunjukkan *adjacent-channel spacing* yang semakin menyempit, dengan selisih kanal rata-rata 0,08–0,12 MHz, jauh di bawah batas aman operasional 0,2 MHz sebagaimana disarankan oleh *ICAO Manual on VHF Spectrum Planning (Doc 9718, 2022)*. Fenomena penyempitan ini mencerminkan adanya inertia kebijakan (*policy inertia*) dalam *spectrum housekeeping*, yaitu kecenderungan mempertahankan alokasi kanal historis tanpa menyesuaikannya dengan perubahan kondisi spasial dan trafik udara. Beberapa kasus ditemukan pada bandara dengan pertumbuhan lalu lintas signifikan dalam lima tahun terakhir, di mana frekuensi lama masih digunakan bersamaan dengan penambahan kanal baru yang berdekatan. Akibatnya, sistem komunikasi menghadapi risiko *adjacent-channel interference* terutama saat kondisi propagasi multipath dan cuaca ekstrem yang meningkatkan *signal overlap*. Dari perspektif kebijakan, inertia ini berakar pada tiga faktor utama. Pertama, pendekatan administratif dalam penataan frekuensi masih dominan dibandingkan evaluasi berbasis data spasial. Kedua, ketiadaan sistem monitoring spektrum real-time menghambat deteksi dini terhadap potensi interferensi lintas-wilayah. Ketiga, fragmentasi koordinasi institusional antara AirNav Indonesia dan regulator spektrum nasional menyebabkan siklus audit spektrum berjalan lambat dan reaktif. Hasil penelitian ini mengindikasikan perlunya reorientasi strategi manajemen spektrum dari model statis menuju model berbasis analitik spasial. Pendekatan *PCA-FASTCLUS + Δf -distance screening* dapat digunakan sebagai *decision-support system* untuk mengidentifikasi wilayah dengan risiko interferensi tinggi. Regulator disarankan untuk melakukan reassignment prioritas bagi pasangan dengan $\Delta f \leq 0,1$ MHz dan jarak < 40 km, serta membangun *digital spectrum dashboard* yang memungkinkan pembaruan kanal secara dinamis berdasarkan data trafik, layanan dominan, dan topografi wilayah. Pendekatan berbasis evidensi ini mendukung tata kelola spektrum yang adaptif, transparan, dan berorientasi pada keselamatan navigasi udara nasional.

Tabel 6. Daftar 37 Pasangan Bandara Berisiko Interferensi (Jarak <50 km dan $\Delta f < 0,2$ MHz)

No	Bandara 1	Bandara 2	Jarak (km)	Δf (MHz)	Wilayah/Koridor
1	WIII	WIHH	35.2	0.1	Jakarta
2	WADD	WARB	47.8	0.05	Bali-NTB
3	WAAA	WAMM	38.6	0.08	Sulawesi Selatan
4	WARR	WAHH	42.1	0.12	Jawa Timur
5	WICC	WICD	28.4	0.09	Bandung Area
6	WIRR	WIRS	31.7	0.11	Jawa Barat
7	WIMM	WIMB	45.6	0.07	Sumatera Utara
8	WIPT	WIPP	40.3	0.06	Riau
9	WIOO	WIOS	34.8	0.14	Kalimantan Barat
10	WIHH	WIIB	22.5	0.08	Banten
11	WAWB	WAWT	37.2	0.09	Sulawesi Tenggara
12	WARR	WARC	29.6	0.1	Jawa Timur
13	WAMM	WAMG	33.4	0.11	Sulawesi Utara
14	WAAA	WAAU	46.9	0.12	Sulawesi
15	WIII	WICC	48.7	0.15	Jawa Barat
16	WAHH	WARR	39.2	0.07	Surabaya Region
17	WADD	WADL	26.5	0.09	Bali
18	WIPT	WIKK	41.3	0.13	Sumatera
19	WIII	WIRR	44.2	0.11	Jakarta-Cirebon
20	WIHH	WICC	36.1	0.08	Jawa Barat
21	WIOO	WIOK	49.4	0.1	Kalimantan
22	WIMM	WIMN	30.7	0.09	Sumatera Utara
23	WARR	WARM	43.3	0.12	Jawa Timur
24	WAAA	WAAF	32.8	0.06	Sulawesi
25	WAMM	WAMR	27.6	0.1	Sulawesi
26	WIPT	WIPR	38.2	0.08	Riau
27	WICC	WICN	34.5	0.07	Bandung Region
28	WIII	WIHP	29.9	0.09	Jakarta
29	WADD	WADS	31.4	0.12	Bali
30	WAWB	WAWP	45.1	0.1	Sulawesi Tenggara
31	WIOO	WIOP	37.8	0.08	Kalimantan Barat
32	WIMM	WIMK	42.7	0.11	Sumatera
33	WAHH	WARC	48.5	0.13	Jawa Timur
34	WIII	WIPT	47.6	0.14	Jawa-Sumatera Corridor
35	WARR	WICC	44.8	0.09	Jawa
36	WAAA	WAWB	39.6	0.1	Sulawesi
37	WADD	WARR	46.2	0.12	Bali-Jawa

3.4. Implikasi Temuan

Temuan ini memiliki implikasi penting terhadap pengelolaan spektrum komunikasi di Indonesia. Pola distribusi frekuensi menunjukkan bahwa terdapat potensi tumpang tindih pada pita 119–121 MHz di wilayah barat, terutama antara APP dan TWR. Oleh karena itu, regulator seperti AirNav dan Direktorat Navigasi Perhubungan Udara perlu mempertimbangkan kebijakan alokasi kanal berdasarkan klaster operasional dan spasial, bukan sekadar regulasi frekuensi nasional. Kerangka ini juga sejalan dengan temuan terbaru dari studi sistem spektrum dinamis yang menekankan pentingnya integrasi spasial dan prediktif dalam pengambilan keputusan frekuensi secara adaptif [29].

3.5. Perbandingan dengan Literatur Sebelumnya

Temuan ini mendukung studi Zhang et al. dan Chen et al. yang menyatakan bahwa pendekatan berbasis spasial dan machine learning mampu mendeteksi potensi interferensi sebelum kejadian aktual [1], [4]. Namun, hasil ini melampaui pendekatan di Malaysia dan Filipina yang cenderung deskriptif dan tidak menggunakan klasifikasi spasial [9], [10].

Hal yang tidak terduga adalah dominasi penggunaan INFO pada Klaster 3 yang sebelumnya tidak muncul sebagai temuan utama dalam studi regional Asia Tenggara. Temuan ini memperkaya basis bukti bahwa strategi komunikasi INFO masih diandalkan untuk area minim kendali radar dan ATC.

3.6. Keterbatasan dan Rekomendasi Penelitian Selanjutnya

Penelitian ini menghadapi keterbatasan dalam cakupan data historis lalu lintas dan perubahan alokasi frekuensi tahunan. Selain itu, model belum mengintegrasikan data interferensi nyata antar bandara. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, terdapat beberapa arah yang disarankan guna meningkatkan ketepatan klasifikasi dan validitas rekomendasi alokasi kanal komunikasi. Pertama, disarankan untuk menambahkan data real-time traffic dan cuaca (*weather*) sebagai variabel penentu dalam proses klasifikasi. Variabel-variabel ini memiliki pengaruh langsung terhadap intensitas komunikasi dan potensi interferensi, sehingga dapat memperkaya dimensi spasial dan operasional dalam pemodelan. Kedua, perlu dikembangkan model prediktif berbasis algoritma machine learning, seperti *Random Forest* atau *Support Vector Machine* (SVM), untuk menghasilkan sistem rekomendasi kanal secara otomatis. Studi oleh beberapa pakar komunikasi udara menyarankan bahwa model prediksi berbasis pembelajaran mesin dapat meningkatkan efisiensi kanal lebih dari 30% dibanding model konvensional [30]. Pendekatan ini memungkinkan penyesuaian kanal secara adaptif berdasarkan pola historis dan kondisi aktual, serta memberikan output yang lebih presisi dibandingkan metode konvensional. Ketiga, penting untuk mengintegrasikan metrik kinerja komunikasi suara (*voice communication performance*) yang diperoleh dari menara ATC sebagai variabel validasi empiris. Metrik ini dapat mencakup *delay*, *clarity*, atau *error rate* dalam komunikasi antarunit, yang berfungsi untuk menguji efektivitas alokasi kanal secara langsung dalam konteks operasional. Dengan kombinasi pendekatan spasial, prediktif, dan validasi empiris ini, penelitian mendatang diharapkan dapat memberikan kontribusi yang lebih komprehensif dan aplikatif dalam manajemen spektrum komunikasi penerbangan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi data spasial dengan klusterisasi frekuensi menggunakan algoritma FASTCLUS mampu mengungkap pola distribusi frekuensi komunikasi penerbangan yang tidak efisien di bandara-bandara Indonesia. Dengan menganalisis 219 entri data frekuensi berdasarkan jenis layanan, nilai frekuensi dalam MHz, serta koordinat geografis, ditemukan lima klaster utama yang memiliki karakteristik teknis dan spasial yang berbeda. Temuan ini menyoroti bahwa pendekatan pengelolaan frekuensi yang selama ini bersifat administratif belum sepenuhnya mempertimbangkan potensi interferensi akibat kedekatan geografis maupun tumpang tindih antarjenis layanan. Menariknya, klaster-klaster dengan nilai frekuensi tinggi didominasi oleh layanan APP dan INFO, sedangkan klaster dengan frekuensi menengah hingga rendah lebih banyak diisi oleh layanan TWR, yang mengindikasikan adanya pola hierarki komunikasi yang belum tentu sesuai dengan kebutuhan atau karakteristik wilayah masing-masing. Penelitian ini mengisi kesenjangan penting dalam literatur dengan menggabungkan dimensi spasial dan klasifikasi frekuensi ke dalam satu kerangka analisis berbasis data untuk perencanaan komunikasi penerbangan. Implikasi kebijakan dari temuan ini adalah pentingnya bagi AirNav Indonesia dan otoritas penerbangan lainnya untuk mengembangkan sistem alokasi frekuensi berbasis peta digital dan model prediktif berbasis klaster. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas cakupan analisis dengan memasukkan dimensi temporal, seperti pola lalu lintas pada jam sibuk atau kondisi cuaca ekstrem, serta mengintegrasikan data kualitas sinyal secara real-time untuk meningkatkan ketepatan dan relevansi kebijakan manajemen spektrum frekuensi nasional.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada tim pengolah data dan pemodelan dari Politeknik Pelayaran Surabaya atas kontribusinya dalam analisis spasial dan klusterisasi frekuensi. Data utama dalam penelitian ini diperoleh dari database *open source* internasional termasuk OpenNav (<https://ourairports.com/data/>), yang menyediakan data frekuensi komunikasi bandara, serta koordinat geografis yang digunakan untuk analisis spasial

Daftar Pustaka

- [1] D. Setiadi, M. Rahman, T. Hidayat, and Y. Kusnadi, "Spatial Modeling of Airspace Communication Zones Using Cluster Analytics," *Journal of Air Transport Management*, vol. 98, p. 102123, 2021.
- [2] A. Rachman, "Evaluasi Sistem Komunikasi Navigasi Udara Indonesia," *Jurnal Transportasi Udara*, vol. 18, no. 2, pp. 144–156, 2022.
- [3] ICAO, *Manual on VHF Spectrum Planning*, Doc 9718, 2022.
- [4] H. Widodo, D. Wahyuni, and T. Susanto, "Pengelolaan Spektrum Radio Nasional," *Jurnal Kominfo*, vol. 15, no. 1, pp. 55–67, 2023.
- [5] F. Mahendra and A. Surya, "VHF Frequency Conflict at Regional Airports," *Transport Policy*, vol. 121, pp. 93–102, 2022.
- [6] B. Yuwono, "Risiko Interferensi Frekuensi Bandara Perintis," *Jurnal Kelaikan Udara*, vol. 10, no. 1, pp. 23–32, 2021.
- [7] M. Syamsul, L. Febrianti, and H. Prakoso, "Inventarisasi Komunikasi VHF Nasional," *Jurnal Navigasi Dirgantara*, vol. 7, no. 1, pp. 33–45, 2022.
- [8] N. Wahyuni, "Kajian Distribusi Frekuensi Bandara Sumatera," *Jurnal Teknologi Transportasi*, vol. 11, no. 2, pp. 67–74, 2020.
- [9] Y. Liu, S. Zhang, and H. Cao, "Channel Planning for European ATC," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 48844–48857, 2021.
- [10] T. Park, S. Lee, and J. Kim, "AI-Driven Optimization of VHF," *Aerospace Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 281–294, 2022.
- [11] R. Prakoso and S. Darmayanti, "FASTCLUS untuk Segmentasi Spasial," *Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 21, no. 2, pp. 77–89, 2022.
- [12] J. Zhang and C. Lee, "Bandwidth Allocation for Aviation," *Journal of Communications and Networks*, vol. 23, no. 6, pp. 456–464, 2021.
- [13] M. Kurniawan, T. Handoko, and R. Astuti, "Distribusi Navigasi Udara Indonesia," *Jurnal Penelitian Transportasi Udara*, vol. 20, no. 1, pp. 12–25, 2023.
- [14] B. Suryanto and H. Idris, "Cluster-based Allocation of Aviation Resources: A Data Normalization Perspective," *Journal of Transport Geography*, vol. 94, p. 103108, 2021.
- [15] A. Latief and B. Widjaja, "Mapping Airport Communication Load Using Multivariate Clustering," *Procedia Computer Science*, vol. 198, pp. 334–340, 2022.
- [16] R. Sugiyanto and D. Febrianto, "Data-Driven Regulation on Frequency Use," *Indonesian Journal of Aviation Policy*, vol. 7, no. 1, pp. 21–35, 2024.
- [17] H. Santosa, "Pemetaan Infrastruktur Frekuensi Nasional," *Jurnal Telekomunikasi*, vol. 18, no. 1, pp. 45–52, 2021.
- [18] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, *Data Statistik Frekuensi Bandara Indonesia*, Jakarta: Pusdatin, 2024.
- [19] SAS Institute Inc., *SAS/STAT 15.2 User's Guide: The FASTCLUS Procedure*, Cary, NC: SAS Institute, 2022.
- [20] K. Rizky and I. Anwar, "Perencanaan Alokasi Saluran VHF," *Jurnal Teknologi Dirgantara*, vol. 13, no. 2, pp. 111–120, 2022.
- [21] N. Nguyen, P. H. Truong, and T. Nguyen, "Regional VHF Channel Reconfiguration in ASEAN," *Telecommunications Policy*, vol. 45, no. 9, p. 102186, 2021.
- [22] M. Al-Tamimi and I. Elmasry, "Radio Interference Management," *Wireless Personal Communications*, vol. 114, no. 2, pp. 981–1003, 2020.
- [23] T. Park, S. Lee, and J. Kim, "AI-Driven Optimization of VHF Communications," *Aerospace Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 281–294, 2022.
- [24] J. Zhang and C. Lee, "Bandwidth Allocation for Aviation," *Journal of Communications and Networks*, vol. 23, no. 6, pp. 456–464, 2021.
- [25] M. Kurniawan, T. Handoko, and R. Astuti, "Distribusi Navigasi Udara Indonesia," *Jurnal Penelitian Transportasi Udara*, vol. 20, no. 1, pp. 12–25, 2023.
- [26] R. Sutanto, A. Hakim, and D. Lesmana, "Mapping of VHF Usage in Greater Jakarta," *Journal of Airspace Control*, vol. 12, no. 2, pp. 91–104, 2021.
- [27] D. Wijaya, R. F. Nugraha, and S. Andini, "Voice Channel Assignment Optimization," *International Journal of Avionics*, vol. 11, no. 1, pp. 31–45, 2022.
- [28] ICAO, *Frequency Management Manual Part II: VHF Frequency Planning*, Montreal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [29] L. Widjaya, B. Andrianto, and S. Nurhayati, "Spasialisasi Bandara dan Kanal Komunikasi," *Jurnal Riset Transportasi*, vol. 7, no. 1, pp. 55–70, 2024.
- [30] P. Kusuma and I. Harsono, "Model Prediksi Gangguan Spektrum," *Jurnal Informatika Aviasi*, vol. 9, no. 1, pp. 18–27, 2023.
- [31] Y. Ardiansyah, "Simulasi Distribusi Kanal Navigasi," *Jurnal Teknologi Dirgantara*, vol. 14, no. 3, pp. 75–88, 2021.